

УДК 519.633+533.5

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СВЕРХЗВУКОВОЙ НЕДОРАСШИРЕННОЙ СТРУИ С ПОВЕРХНОСТЬЮ ¹⁾

А.К. АЛЕКСЕЕВ¹, А.Е. БОНДАРЕВ^{2,3}

¹ РКК Энергия, г. Королев, ² Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный,

³ Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва

E-mail: aleksey.k.alekseev@gmail.com; bond@keldysh.ru

MODELING OF TIME-DEPENDENT MODES FOR SUPERSONIC UNDEREXPANDED JET INTERACTING WITH PLATE

A.K. ALEXEEV¹, A.E. BONDAREV^{2,3}

¹ RSC Energia, Korolev, ² Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny,

³ Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, Moscow

Аннотация

В работе рассматриваются нестационарные процессы взаимодействия сверхзвуковой недорасширенной струи с плоской поверхностью. Проводится численное исследование возникновения характерных нестационарных режимов обтекания. Исследуются условия возникновения автоколебательного режима взаимодействия, сопровождающегося появлением и распадом отрывных зон. Рассматриваются вязкие и невязкие постановки задачи.

Ключевые слова: колебательные режимы, недорасширенная струя, отрывные зоны

Summary

The paper considers time-dependent processes of supersonic underexpanded jet interaction with flat plate. Numerical investigations are performed to study some special modes of interaction. The goal of studies is to consider the conditions for existence of oscillating mode where separation zones can appear and disappear. Both cases for inviscid and viscous flows are considered.

Key words: oscillating modes, underexpanded jet, separation zones

Введение

Известно, что при нормальном воздействии недорасширенной сверхзвуковой струи на плоскую поверхность в некоторых случаях наблюдаются автоколебательные режимы течения [1, 5]. Автоколебания в зоне взаимодействия струи с преградой имеют как существенный теоретический интерес так и вполне осязаемый практический (например, могут вызвать существенные акустические воздействия на летательный аппарат при посадке или взлете). Режим течения зависит от таких параметров, как число Маха на срезе Ma , степень нерасчетности $n = p_0/p_a$, расстояние от среза сопла x/d_a , соотношение удельных теплоемкостей $\gamma = c_p/c_v$. По данным работы [1] в расчетах удастся получить автоколебания такого типа в рамках невязкого течения, описываемого осесимметричными уравнениями Эйлера. Эти автоколебания связаны с возникновением отрывной зоны по центру струи.

Основной целью работы являлось исследование условий появления подобных колебательных режимов и определение диапазонов определяющих параметров, где такие режимы возникают. На данном начальном этапе основная задача представлялась как получение в расчетах подобных режимов в принципе.

¹⁾ Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 13-01-00367, 14-01-00769)

1. Результаты расчетов

В данном докладе представлены результаты численного моделирования воздействия струи на плоскую поверхность с помощью нестационарных уравнений Эйлера. Расчеты проводились с помощью методов второго и четвертого порядков точности по пространственной координате, описанных в работах [6, 7] и второго порядка по времени. На некоторых режимах по x/d_a , γ , n , M_a наблюдалось появление автоколебаний. На рис. 1 представлена история изменения давления на оси симметрии. Можно выделить три режима: режим формирования течения, режим развития автоколебаний и периодический автоколебательный режим, представленный в детальном виде на рис. 2.

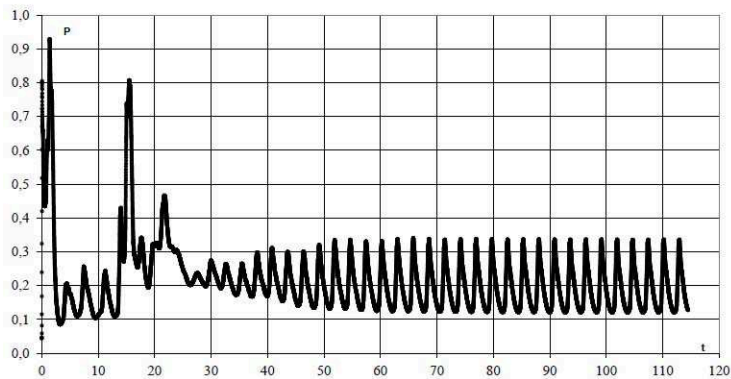


Рис. 1: Давление на оси симметрии в зависимости от времени. Полная картина.

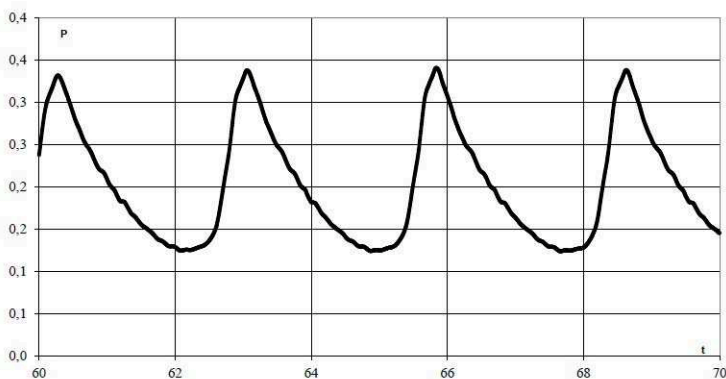


Рис. 2: Давление на оси симметрии в зависимости от времени. Автоколебательный режим.

Для автоколебательного режима характерно периодическое образование и исчезновение отрывной зоны. Обычно причиной отрыва в таких течениях является наличие периферийных максимумов давления, связанных с "бочкообразной" структурой течения в струе. На рис. 3 и 4 представлены изолинии плотности для случая максимального и минимального давления в центре, а также соответствующие линии тока. Минимум давления по центру соответствует развитой отрывной зоне, максимум давления реализуется при безотрывном течении. На рис. 5 представлены изолинии плотности и линии тока на участке спада давления после максимума. На рис. 6 представлено распределение плотности и линии тока на участке

спада давления после максимума. В обоих случаях циркуляционная зона отсутствует. Циркуляционная зона наблюдаема в некоторой окрестности пологого минимума давления.

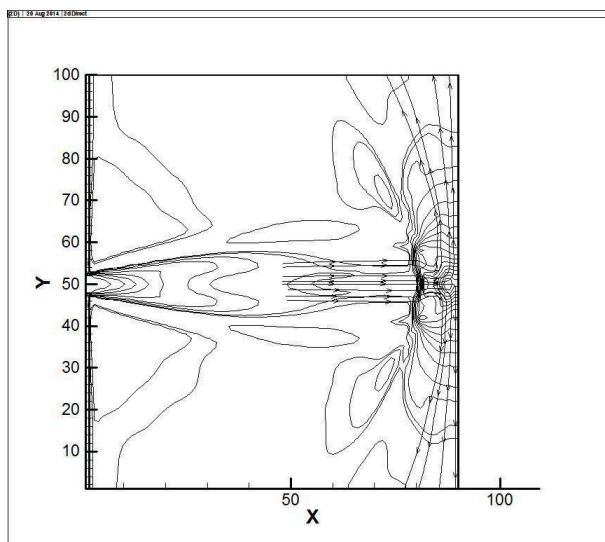


Рис. 3: Распределение плотности и линии тока при максимальном давлении на оси. Циркуляционная зона отсутствует.

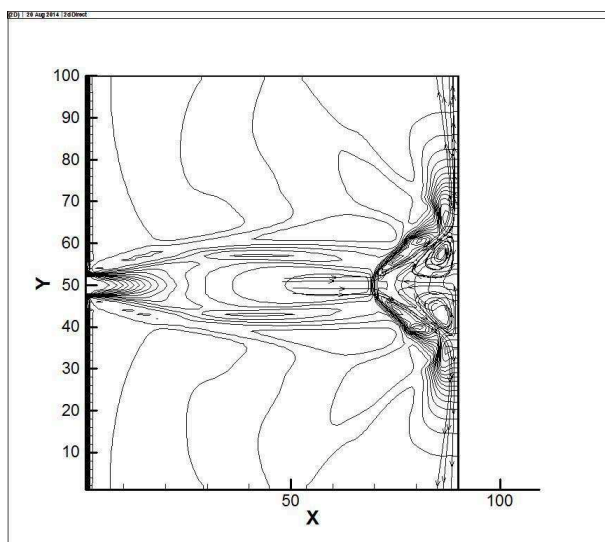


Рис. 4: Распределение плотности и линии тока при минимальном давлении на оси. Циркуляционная зона присутствует.

По данным работы [2] расстояние до преграды, когда начинаются автоколебания $x/r_a \sim \sqrt{4nM_a}$. Результаты расчетов представлены для числа Маха на срезе $M_a = 4.0$, $\gamma = 1.4$, $x/d_a = 15$, нерасчетности $n = 4$, возникновение колебаний примерно соответствует критерию работы [2].

2. Заключение.

Таким образом, решение уравнений Эйлера позволяет получить достаточно правдоподобную модель

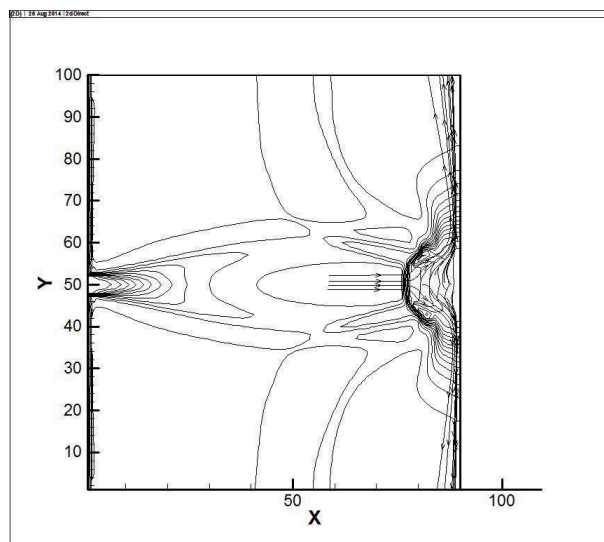


Рис. 5: Распределение плотности и линии тока на участке спада давления после максимума. Циркуляционная зона отсутствует.

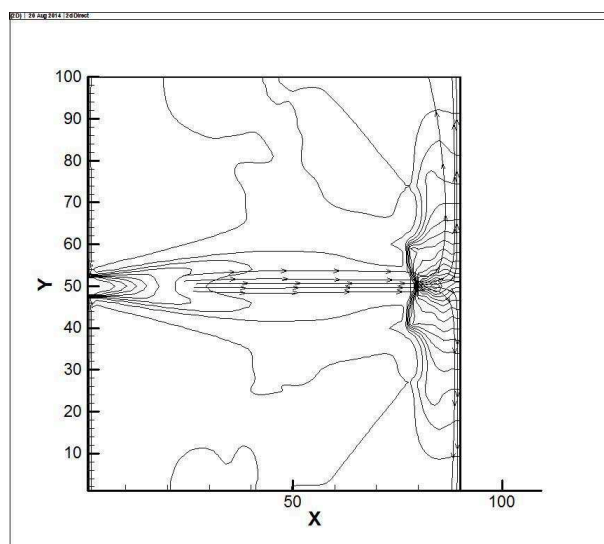


Рис. 6: Распределение плотности и линии тока на участке спада давления после максимума. Циркуляционная зона отсутствует.

автоколебаний в струе, набегающей на пластину. Следует отметить, что аналогичная серия расчетов была проведена для уравнений Навье–Стокса. Рассматривался ламинарный режим течения при числе Рейнольдса равном $Re = 10^3$. При этом для аналогичных значений определяющих параметров задачи режим возникновения колебаний не обнаружен. Однако, моделирование течения в рамках уравнений Эйлера не позволяет определять такие важные характеристики течения, как теплообмен на поверхности. Для этого необходимо решение уравнений Навье–Стокса, более того, большая часть моделей турбулентной вязкости дает неприемлемо низкое качество расчетов в отрывной зоне [4]. Вследствие этого представляется вероятным, что для корректного и практически полезного моделирования данного типа течения необходимо привлечение методов LES или DNS, с соответствующими вычислительными ресурсами.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Pundir B., Dhanak M.** Surface Pressure Fluctuations Due to an Impinging Supersonic Underexpanded Jet // AIAA 2010-107.
2. **Глазнев В.Н., Запрягаев В.И., Усков В.Н. и др.** Струйные и нестационарные течения в газовой динамике. — Новосибирск: СО РАН, 2000.
3. **Lee K., Hong S.** Supersonic Jet Impingement Navier-Stokes Computations for Vertical Launching System Design Applications // J. Spacecraft and rockets. — 2004. — V. 41, № 5.
4. **Vuorinen V., Yu J., Tirunagari S., Kaario O., Larmi M., Duwig C. and Boersma B.J.** Large-eddy simulation of highly underexpanded transient gas jets // Physics of fluids. — 2013. — 25, 016101.
5. **Zuckerman N. and Lior N.** Jet Impingement Heat Transfer: Physics, Correlations, and Numerical Modeling // Advances in heat transfer. — 2006. — V. 39. — P. 565–631.
6. **Sun M., Katayama K.** An artificially upstream flux vector splitting for the Euler equations // JCP. — 2003. — V. 189. — P. 305–329.
7. **Yamamoto S., Daiguji H.** Higher-order-accurate upwind schemes for solving the compressible Euler and Navier-Stokes equations // Computers and Fluids. — 1993. — V. 22. — P. 259–270.

REFERENCES

1. **Pundir B., Dhanak M.** Surface Pressure Fluctuations Due to an Impinging Supersonic Underexpanded Jet // AIAA 2010-107.
2. **Glaznev V.N., Zapryagaev V.I., Uskov V.N. et al.** Jets and unsteady flows in gas dynamics [Struynye i nestacionarnye techeniya v gazovoy dinamike]. — Novosibirsk: SB RAS, 2000. (in Russian)
3. **Lee K., Hong S.** Supersonic Jet Impingement Navier-Stokes Computations for Vertical Launching System Design Applications // J. Spacecraft and rockets. — 2004. — V. 41, № 5.
4. **Vuorinen V., Yu J., Tirunagari S., Kaario O., Larmi M., Duwig C. and Boersma B.J.** Large-eddy simulation of highly underexpanded transient gas jets // Physics of fluids. — 2013. — 25, 016101.
5. **Zuckerman N. and Lior N.** Jet Impingement Heat Transfer: Physics, Correlations, and Numerical Modeling // Advances in heat transfer. — 2006. — V. 39. — P. 565–631.
6. **Sun M., Katayama K.** An artificially upstream flux vector splitting for the Euler equations // JCP. — 2003. — V. 189. — P. 305–329.
7. **Yamamoto S., Daiguji H.** Higher-order-accurate upwind schemes for solving the compressible Euler and Navier-Stokes equations // Computers and Fluids. — 1993. — V. 22. — P. 259–270.